第46卷 第6期
2023年6月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

库布齐沙漠边缘不同下垫面风沙流物质再分配及对营养元素的富集作用

闫 敏[1,2]， 陈宇鑫[3,4]， 左合君[1,2]， 王海兵[1,2]， 席 成[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；3. 水利部牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020；4. 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文野外科学观测研究站，北京 100038）

摘 要：以库布齐沙漠流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林和农田5种下垫面为研究对象，采用野外观测与室内分析的方法对其地表与0~100 cm风沙流中沉积物的粒度及其元素特征进行分析。结果表明：(1) 农田和有植被覆盖地表的地表粗糙度较流动沙地明显增加，10 cm处风速减少18%以上，总输沙量平均减少85.6%。(2) 不同粒度沙粒中Cu、Fe、Mn、Zn含量差异明显，Cu、Zn元素在粉砂中含量最高，Mn元素在极细砂中含量最高，Fe元素在细砂中含量最多。(3) 在风沙流物质再分配作用下，风沙流中粉砂和极细砂含量随着高度的上升而增加，平均较地表增加了约14倍，Cu、Zn、Mn元素含量随之增加，风沙流中随高度上升细砂含量先增加后减少，Fe元素含量也呈现出先增加后减少的趋势，这与原地表中元素含量、地表沉积物不同粒径中元素含量特征密切相关。

关 键 词：风沙流；粒度组成；元素迁移；库布齐沙漠

文章编号：1000－6060(2023)06－0889－11(0889～0899)

Cu、Fe、Mn、Zn元素在自然界中分布广泛[1]，但在土壤中含量极低，主要以氧化物结合态、交换态、有机结合态、碳酸盐结合态和残渣态的形态存在[2-3]。虽然土壤中营养元素含量很低，在植物体内也仅占植物干重的$10^{-5}\%$~$10^{-1}\%$，却对植物的正常生长有着不可或缺的作用[4-5]。Cu元素增强植物抗寒抗旱的能力，参与植物的光合作用；Fe元素是合成叶绿素的重要元素，对植物光合作用、呼吸作用均起到重要作用；Mn元素参与蛋白质和无机酸的代谢，对叶绿素的形成和糖类的累积转运具有重要作用；Zn元素参与生长素的合成，促进植物生长与种子成熟[6]。土壤中营养元素含量的差异主要受自然因素和人为因素的影响，其中人为因素主要包括人类生产生活过程中的种植、施肥、矿业活动等[7]，自然因素主要来自于土壤母质，不同质地土壤中风化矿物含量的差异也会对土壤中元素含量产生影响[8-10]。因此，摸清土壤中Cu、Fe、Mn、Zn元素变化规律具有重要意义。

风沙流是空气与沙质土地相互作用形成的运动气流，地表在风沙流的吹蚀和磨蚀作用下使土壤母质剥离、分选、搬运、堆积，是形成风蚀地貌的重要地球物理过程[11]。土壤风蚀不仅导致干旱、半干旱地区土地退化，而且是致使土地沙漠化和形成沙尘暴灾害的主要原因[12]。前人研究表明，地表植被可以有效增加地表粗糙度、降低地表风速，从而减轻地表风蚀，减少地表土壤中细颗粒物质以及营养元素流失[13]。植被对地表风蚀的影响主要表现在地表风蚀率的变化，影响程度主要取决于地表植被的覆盖度、高度、密度等因素[14-15]。近年来国内外学者通过野外观测、风洞实验以及数据模拟等方法对不同下垫面风沙流结构、风沙流粒度特征、风蚀率、地表粗糙度等变化特征取得大量研究成果[16-18]。而

收稿日期：2022-08-17； **修订日期：**2022-09-27
基金项目：“科技兴蒙”行动重点专项项目课题—“库布齐沙漠生态保护与治理技术研究”(KJXM-EEDS-2020006)资助
作者简介：闫敏(1992-)，男，博士，讲师，主要从事荒漠化防治及交通线路沙害、风吹雪害防治研究. E-mail: ym5233@126.com
通讯作者：左合君(1971-)，男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事荒漠化防治、道路风沙及风吹雪灾害防治研究. E-mail: zuohj@126.com

在风沙搬运过程中，地表沉积物中细颗粒物质流失，微量元素也随之输移，但有关于不同下垫面在风蚀过程中营养元素的富集差异鲜有报道。

鉴于此，本文选择库布齐沙漠流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林和农田为研究对象，对其地表土壤样品及其风沙流进行测定，分析不同下垫面近地表0~100 cm风沙活动、地表及其风沙流粒度特征，以及对营养元素富集特征的影响，揭示库布齐沙漠不同下垫面风蚀特征，结果可为沙区生态修复和植被建设提供理论支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于库布齐沙漠（图1），地理位置介于108°39′~108°41′E，40°30′~40°31′N之间，处于干旱、半干旱地区过渡带，春季少雨干旱且风沙大，常年平均气温6 ℃，极端最高气温38.1 ℃，极端最低气温-30.5 ℃。降水集中在7—8月，年平均降水量250 mm，年平均蒸发量2100~2955 mm。年平均风速3.5 m·s^{-1}，最大风速达28.7 m·s^{-1}，风期集中在1—5、11、12月。地貌以固定沙地、流动及半固定沙丘为主，土壤类型主要以风沙土为主[19]。流动沙地、农田无植被，封沙育草带植被主要有砂蓝刺头（*Echinops gmelinii*）、沙鞭（*Psammochloa villosa*）、沙蓬（*Agriophyllum squarrosum*），防风阻沙林植被主要有小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）、北沙柳（*Salix psammophila*），农田防护林植被以小叶杨（*Populus simonii*）为主。

1.2 研究方法

1.2.1 野外试验

（1）实验时间与样地选取：2021年3—4月，选取库布齐沙漠独贵塔拉镇外围封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林、农田和外围流动沙地（CK）为研究对象，观测其风沙特征并进行样品采集。

（2）风速测定：在实验样地内分别布置一组HOBO风速风向采集仪，每2 s采集一组风速数据，采集高度分别为10 cm、30 cm、50 cm和100 cm。

（3）输沙测定：输沙采集使用旋转型集沙仪，集沙仪高度为100 cm，每层集沙口径为2 cm×2 cm，共50层，集沙口始终朝向来沙风向。各下垫面输沙与风速同步采集，在风沙活动较强烈时集沙10 min，同一风速条件下重复3次，测试结束后收集样品装入自封袋。

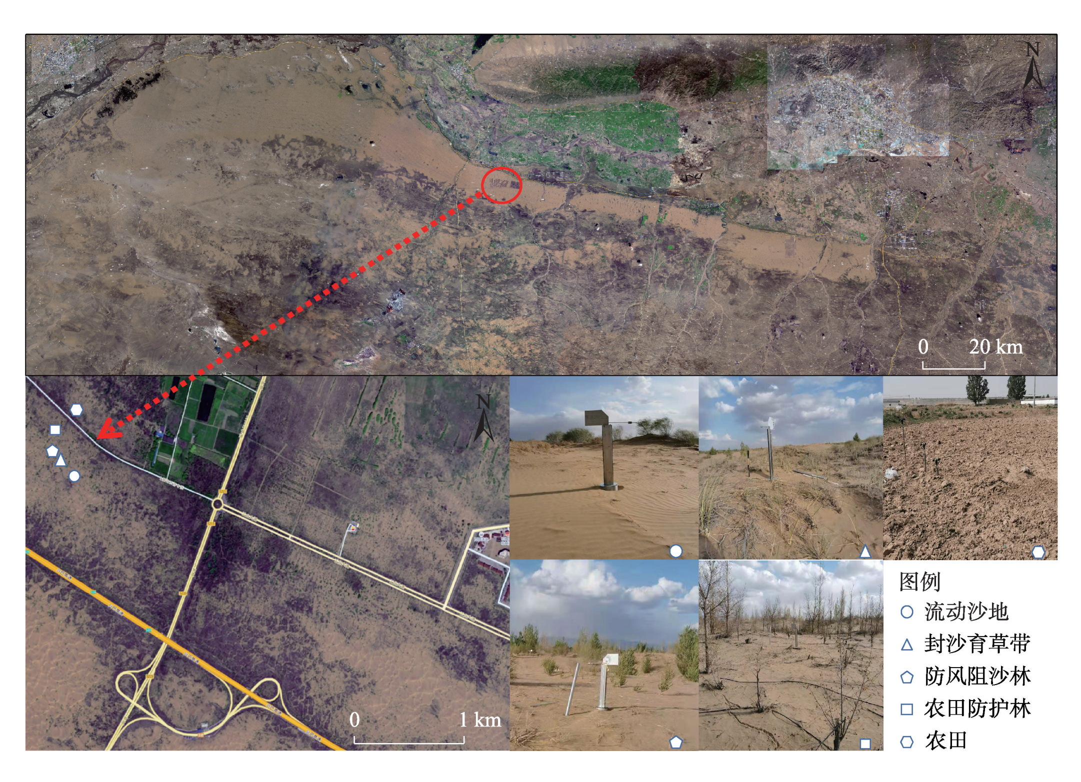


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

（4）土壤样品采集：在每个下垫面均匀采集5处近地表0~2 cm层土壤样品。

1.2.2 室内实验

（1）粒径特征测定：粒度测定使用英国Malvern公司生产的Mastersizer3000型激光粒度仪对各高度层粒径特征进行测定。测定样品需≥2.5 g，因此本文粒径分析将风干后的样品每层称出2.5 g，使用过氧化氢、盐酸去除样品中的有机质和次生的碳酸盐类物质。在称取样品时如果某层不足2.5 g，将几层混合至2.5 g后进行测定，土壤粒径采用美国制分级标准进行划分，测定结束后并将3组试验数据进行平均以减少实验误差。

（2）Cu、Fe、Mn、Zn元素测定：用pH 7.3的DTPA缓冲溶液作为浸提剂，螯合浸提出土壤中有效态Cu、Fe、Mn、Zn后，使用日立ZA3000系列偏振塞曼原子吸收分光光度计测定。

地表样品：将样品称出10 g后，加入20 mL DTPA缓冲溶液，放在震荡机上震荡2 h使样品中元素充分溶解于DTPA缓冲溶液，结束后过滤2 h。

风沙流中样品：为满足实验测定样品需要10 g的要求，将0~4 cm、4~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~70 cm和70 cm以上集沙分别混合后按上述步骤测定。

1.2.3 数据处理

（1）不同下垫面地表粗糙度(z_0)的计算公式为：

$$\lg z_0 = \frac{\lg z_2 - \dfrac{u_2}{u_1}\lg z_1}{1 - \dfrac{u_2}{u_1}} \quad (1)$$

式中：u_1、u_2分别为已知高度z_1、z_2处风速。

（2）元素含量富集系数(EF)的计算公式为：

$$\mathrm{EF} = \frac{X}{Y} \quad (2)$$

式中：X为样品中元素含量；Y为地表沉积物元素含量。

2 结果与分析

2.1 观测期风沙环境特征

由图2可知，观测期间研究区以W、WSW风为主，其中W风占18.2%，WSW风占15.0%，研究区平均风速为6.7 m·s^{-1}，最大风速为14.3 m·s^{-1}，其中大于11 m·s^{-1}风速占比为2.8%。有植被地表较流动沙地风速明显降低，而农田地表多为板结土块，地表粗糙度大于流动沙地，近地表风速也明显较低。其中封沙育草带风速降低程度最为明显，且在10 cm高度风速降低幅度最大，较流动沙地降低74.1%，防风阻沙林、农田防护林、农田10 cm处风速较流动沙地分别降低18.9%、26.1%、23.0%。随高度上升防风效能降低，与流动沙地相比，封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林、农田100 cm处风速分别降低12.10%、5.01%、7.54%、0.60%。流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林、农田地表粗糙度分别为0.010、4.890、0.072、0.084、0.163，封沙育草带地表粗糙度最大，其次是农田，农田防护林和防风阻沙林差距不大。

各下垫面输沙率具有明显差异，在11 m·s^{-1}风速背景下，与流动沙地相比各下垫面输沙量明显降低，流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林、农田总输沙量分别为596.1 g、25.3 g、249.6 g、55.4 g、23.2 g。各下垫面风沙流随高度上升输沙率呈现逐渐减少的趋势，风沙活动主要集中在0~20 cm高度层，流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田

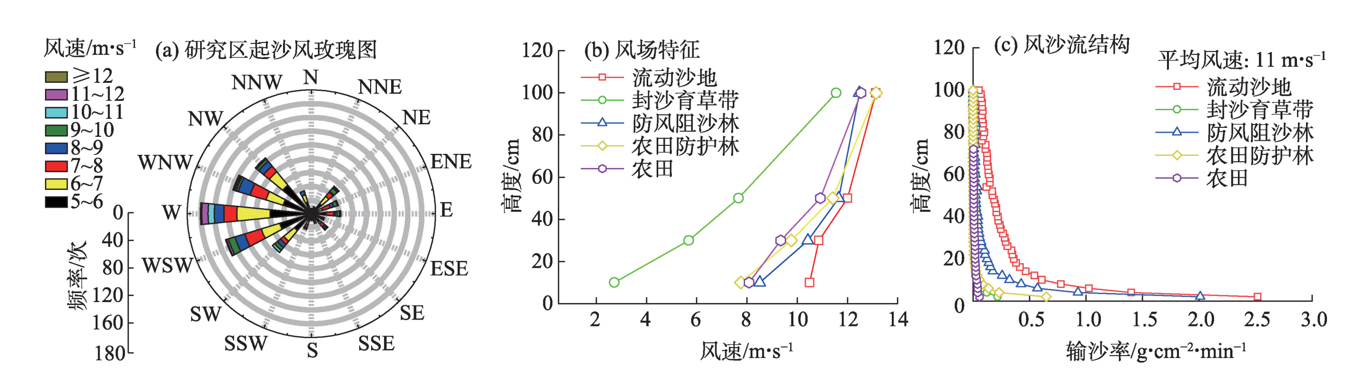


图2 研究区风场特征及其风沙流结构特征

Fig. 2 Characteristics of wind field and its aeolian sand flow structure in the study area

防护林、农田0~20 cm输沙量分别占其总输沙量的57.3%、89.7%、81.7%、91.3%和58.1%。

2.2 不同下垫面地表粒度与营养元素含量特征

由图3可知，各下垫面地表沉积物种中均以细砂为主，其中流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林地表沉积物机械组成相近，细砂平均含量为68.23%，其次为中砂，平均含量为26.8%，极细砂、粉砂含量较低，分别为2.27%、2.69%。农田地表沉积物细颗粒含量较高，细砂占50.37%，粉砂和极细砂分别占23.54%、22.42%，中砂含量较低仅占3.67%。

各下垫面地表样品中Cu、Fe、Mn、Zn元素含量存在明显差异，流动沙地Cu、Fe、Mn、Zn元素含量分别为0.31 mg·kg^{-1}、8.52 mg·kg^{-1}、0.90 mg·kg^{-1}、0.28 mg·kg^{-1}，封沙育草带Cu、Fe、Mn、Zn元素含量分别为0.23 mg·kg^{-1}、7.90 mg·kg^{-1}、1.06 mg·kg^{-1}、0.48 mg·kg^{-1}；防风阻沙林Cu、Fe、Mn、Zn元素含量分别为0.74 mg·kg^{-1}、9.30 mg·kg^{-1}、1.08 mg·kg^{-1}、0.57 mg·kg^{-1}；农田防护林Cu、Fe、Mn、Zn元素含量分别为0.53 mg·kg^{-1}、9.28 mg·kg^{-1}、0.50 mg·kg^{-1}、0.56 mg·kg^{-1}；农田Cu、Fe、Mn、Zn元素含量分别为0.22 mg·kg^{-1}、5.84 mg·kg^{-1}、0.70 mg·kg^{-1}、0.20 mg·kg^{-1}。

2.3 不同粒度组分中营养元素含量特征

由图4可以看出，各营养元素在不同粒径沙粒含量明显不同，随着沙粒粒径的减小呈现出不同变化规律。Cu、Zn元素在各下垫面均随沙粒粒级减小而增加，在粉砂中含量最高。其中Cu元素在流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林粉砂中的含量较中砂中的含量增加明显，平均增加2.7 mg·kg^{-1}，农田中Cu元素含量较低，粉砂较中砂仅增加0.4 mg·kg^{-1}，Zn元素含量在各下垫面地表沉积物中粉砂较中砂增加幅度相近，平均增加1.31 mg·kg^{-1}。Mn元素含量随着粒径的减小呈现先增加后减少的变化趋势，在极细砂中含量最高，在中砂中含量最低，各下垫面极细砂中含量较中砂中平均增加1.84 mg·kg^{-1}。Fe元素在流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林土壤中含量随粒径降低先增加后减少，在细砂、极细砂中含量最高，在中砂含量最低，平均增加6.18 mg·kg^{-1}，农田中Fe元素随粒径减小而增加，在粉砂中含量最高，较中砂增加3.44 mg·kg^{-1}。

2.4 不同下垫面风沙流中粒度与营养元素富集特征

由图5可知，各下垫面风沙流粉砂、极细砂含量随高度上升含量增加，中砂含量减少，细砂在农田风沙流中随高度上升含量减少，其余下垫面先增加后减少。除农田外各下垫面地表中粉砂、极细砂、细砂、中砂之比差异不大，各粒径平均之比为2:3:68:27，农田中各粒径占比为24:22:53:0。在0~30 cm风沙流中粉砂、极细砂含量变化幅度较小，农田中细砂含量减少，其余下垫面中砂含量减少，细砂含量增加，且细砂在30 cm处含量达到峰值，此时农田各粒径之比为27:25:47:0，其余下垫面各粒径平均之比为4:8:75:13；30 cm以上高度层极细砂、粉砂含量明显增加，中砂、细砂含量大幅减少，此时流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林各粒径平均之比为20:35:36:8，农田各粒径之比为40:43:17:0。

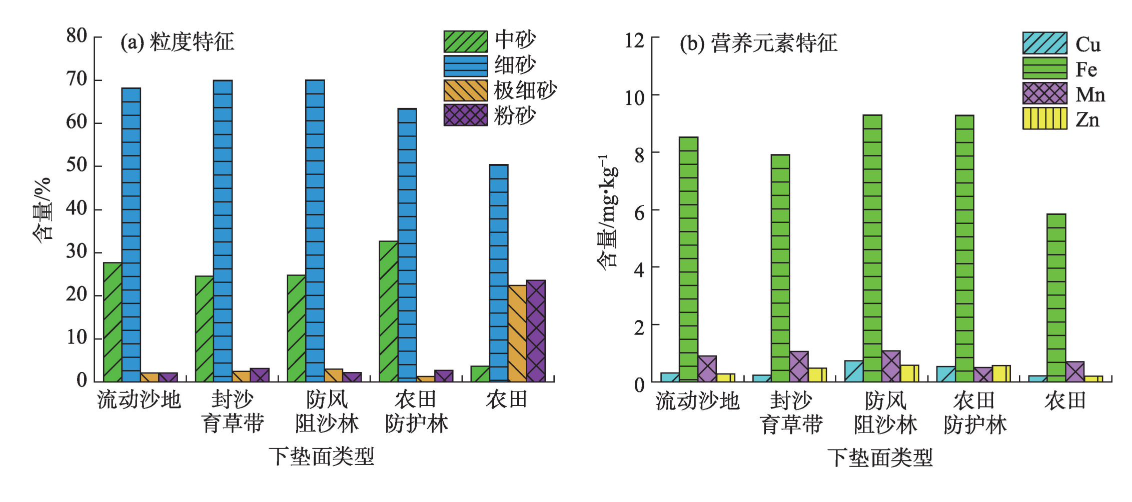


图3 不同下垫面地表沉积物粒度及营养元素含量特征

Fig. 3 Particle size and nutrient content characteristics of surface sediments on different underlying surfaces

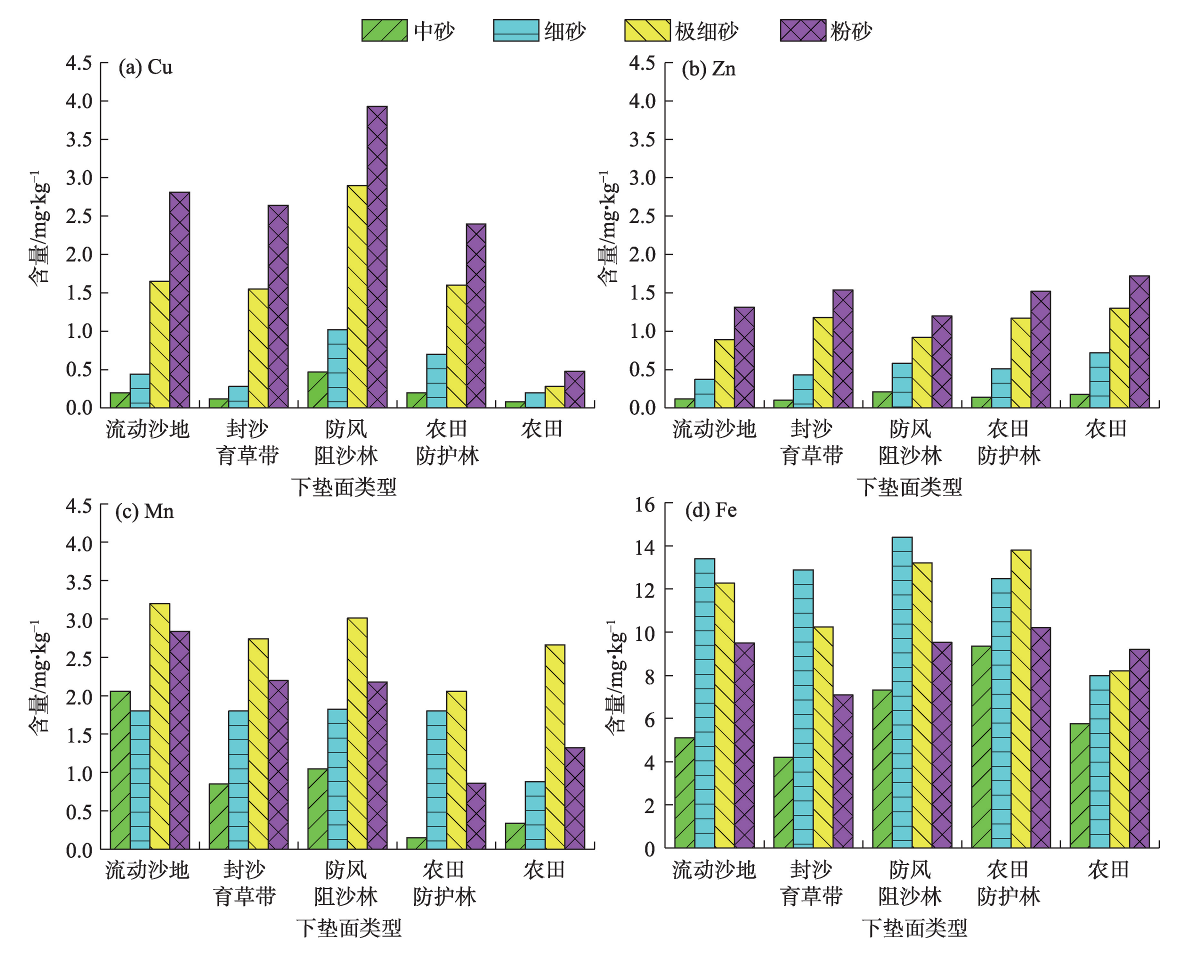


图4　地表沉积物中不同粒径营养元素含量

Fig. 4　Nutrient content in surface sediments of different particle sizes

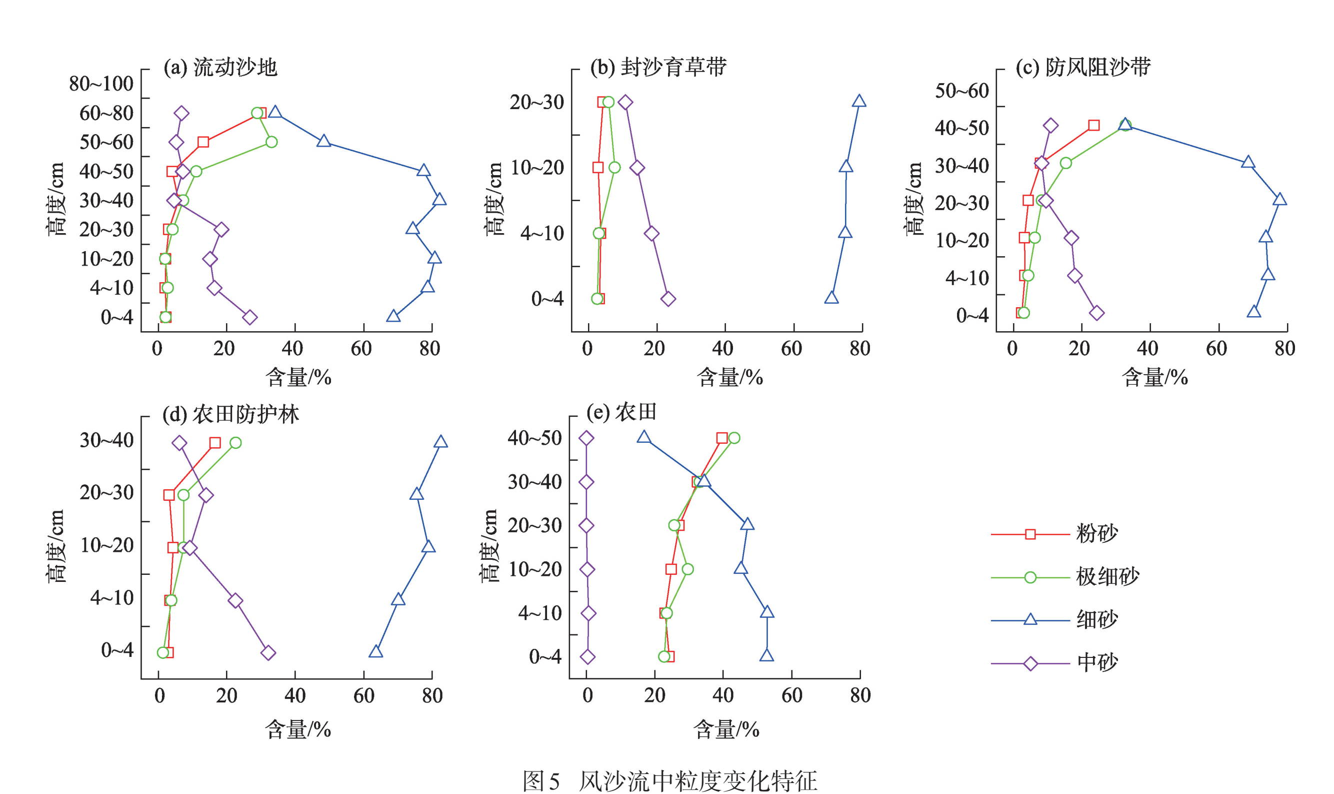


图5　风沙流中粒度变化特征

Fig. 5　Characteristics of particle size change in aeolian sand flow

由图6可知，不同营养元素在0~100 cm风沙流中表现出不同的富集规律，风沙流中各元素富集系数≥1，较地表呈现不富集不亏损或富集。随风沙流上升各下垫面Cu、Zn元素含量随高度上升线性递增的趋势相关性显著，元素富集系数也逐渐增加，流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林、农田风沙流最顶层Cu元素富集系数分别为6.26、6.52、4.12、4.09、1.82，Zn元素富集系数分别为3.96、2.60、2.53、2.46、6.30；流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林风沙流中Mn元素含量线性递增并且相关性显著，Mn元素富集系数也逐渐增加，其风沙流最顶层Mn元素富集系数分别为2.70、1.93、2.80、2.08，农田风沙流中Mn元素含量先增加后减少，通过多项式拟合得出农田风沙流中Mn元素在37.21 cm处含量达到峰值，Mn元素富集系数在农田风沙流中先增加后减少，在元素含量峰值处富集系数为3.43；Fe元素在农田风沙流中含量随高度上升呈线性递增趋势，风沙流最顶层Fe元素富集系数为1.41，流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林风沙流中随高度上升呈现先增加后减少的趋势，通过多项式拟合，Fe元素含量分别在44.38 cm、12.29 cm、29.48 cm、38.37 cm处达到峰值，元素富集系数也先增加后减少，含量达到峰值处富集系数分别为1.50、1.32、1.45、1.38。

2.5 风沙流中粒度与元素含量的关系

表1为不同下垫面风沙流中营养元素含量与粒度特征的相关性。由表可知，不同下垫面风沙流中Cu、Zn元素含量与粉砂和极细砂相关系数在0.625~0.986之间，呈正相关关系，与细砂和中砂相关系数在-0.979~-0.513之间，呈负相关关系，其中Cu、Zn元素含量与粉砂含量相关系数最为突出，说明风沙流中Cu、Zn元素含量随粉砂、极细砂含量的增加而增加。Mn元素在农田防护林风沙流中与粉砂、极细砂和细砂含量呈显著正相关关系，与中砂呈现显著

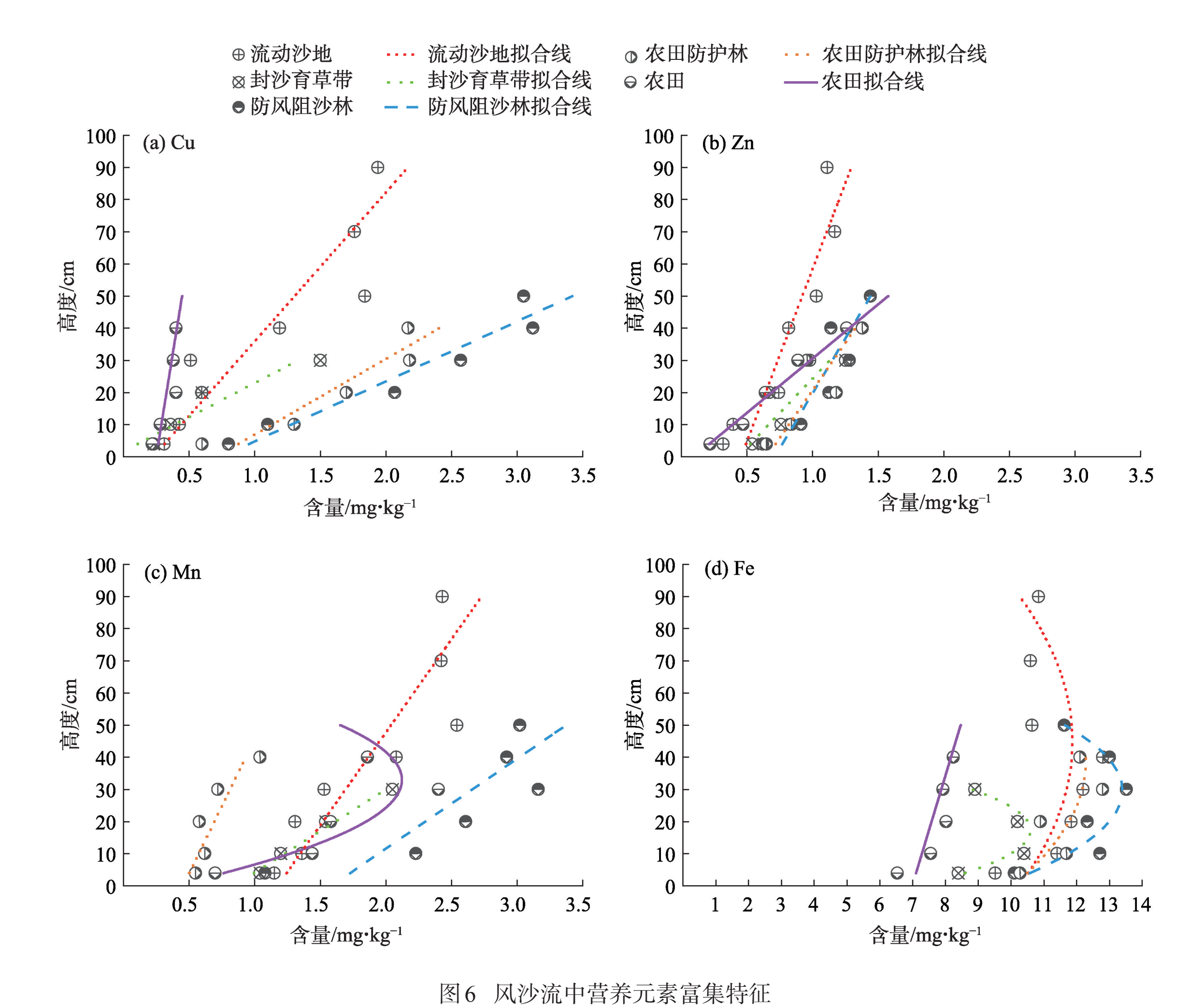


图6 风沙流中营养元素富集特征

Fig. 6 Characteristics of nutrient enrichment in aeolian sand flow

表1　不同下垫面风沙流中微量元素含量与粒度特征相关性分析

Tab. 1　Correlation analysis of trace element content and particle size characteristics in aeolian sand flow on different underlying surfaces

下垫面类型	元素含量	粉砂	极细砂	细砂	中砂
流动沙地	Cu	0.802*	0.737*	-0.620	-0.876**
	Zn	0.625	0.671	-0.513	-0.761*
	Mn	0.657	0.727*	-0.524	-0.892**
	Fe	-0.722	-0.754	0.891	-0.812
封沙育草带	Cu	0.986**	0.958**	-0.979**	-0.734
	Zn	0.895*	0.844*	-0.878*	-0.677
	Mn	0.987**	0.991**	-0.975**	-0.850*
	Fe	-0.711	-0.610	0.769	-0.966
防风阻沙林	Cu	0.938**	0.898*	-0.894**	-0.943**
	Zn	0.875*	0.758*	-0.771*	-0.928**
	Mn	0.674	0.832*	-0.705*	-0.872*
	Fe	-0.723	-0.957	0.802	-0.953
农田防护林	Cu	0.958**	0.911**	-0.784*	-0.952**
	Zn	0.867*	0.855*	-0.608	-0.877*
	Mn	0.608*	0.730*	0.758**	-0.862*
	Fe	-0.739	-0.895	0.928*	-0.976*
农田	Cu	0.749*	0.662	-0.713*	-0.815*
	Zn	0.953**	0.923**	-0.946**	-0.782*
	Mn	0.794*	0.831*	-0.607	-0.663
	Fe	0.868	0.853	-0.818	-0.852

注：*、**分别代表相关性显著、极显著。

负相关关系，在其余下垫面风沙流中Mn元素含量与粉砂和极细砂相关系数在0.657~0.991之间，除流动沙地粉砂与Mn元素呈正相关外，其余均呈显著正相关关系，与细砂和中砂相关系数在-0.975~-0.524之间，呈现负相关关系，与极细砂正相关性最为显著，说明风沙流中Mn元素随粉砂和极细砂含量的增加而增加。Fe元素在农田中与粉砂、极细砂呈正相关关系，与细砂和中砂呈现负相关关系，其中与粉砂正相关性最为显著，在其余风沙流中Fe元素含量与粉砂、极细砂和中砂相关系数在-0.976~-0.610之间，呈现负相关关系，与细砂呈正相关关系，说明农田风沙流Fe元素含量随粉砂和极细砂含量增加而增加，其余下垫面随细砂含量增加而增加。

3　讨论

粒度是沉积物的重要特征，沉积物的粒度组成受沉积物来源、搬运条件、沉积环境等因素影响，分析沉积物粒度特征对区分沉积环境、搬运方式等方面具有重要意义[20-21]。库布齐沙漠地表沉积物以细砂和中砂为主，不同沙漠受风力、植被覆盖等因素的影响，从微观尺度上地表沉积物粒度特征会出现差异[22-23]。本文结果显示流动沙地、封沙育草带、防风阻沙林、农田防护林地表沉积物均以细砂为主，占地表沉积物的60%~71%，中砂次之，极细砂和粉砂较少，仅占1.25%~3.12%，这与前人研究结果相近[24-25]。但农田由于长时间耕作、施肥等人为干扰，与其余地表沉积物粒度特征对比细砂、中砂含量明显减少，分别占50.37%和3.67%，粉砂、极细砂明显增加，分别占23.54%和22.42%。不同下垫面由于地表植被差异，近地表风速廓线具有明显差异，各下垫面中封沙育草带对风速的削弱能力最强，与流动沙地10 cm处风速对比削弱74.1%，其余下垫面分别降低18.9%、26.1%、23.0%，但随高度上升，防风效能逐渐降低，100 cm处各下垫面风速降低不足12.50%。通过计算各下垫面地表粗糙度从大到小依次为封沙育草带、农田、农田防护林、防风阻沙林、流动沙地。不同下垫面对近地表风场的影响，呈现出不同的风沙流结构。有研究表明，盖度

越大近地表风速减弱越明显，不同下垫面输沙率与高度成负幂数函数关系，风沙活动主要集中在0~30 cm[26-27]。本研究与前人研究结果相近，各样地输沙率随高度上升呈负幂函数递减的趋势，输沙主要集中在0~20 cm高度内，占总输沙量的57%以上。与流动沙地对比，有植被地表的地表粗糙度明显增大，近地表风速降低，总输沙量明显减少。而农田虽无植被覆盖，但地表多为板结土块，地表粗糙度较大且土壤不易流失，总输沙量也明显减少。除防风阻沙林与流动沙地相比总输沙量减少58.1%外，其余下垫面均减少90.0%以上。不同粒径沙粒由于质量、形态的差异，风沙流中不同粒径沙粒随高度上升含量变化存在显著差异。黎小娟等[28]发现在流动沙地风沙流中极细砂和粗粉砂随高度上升含量指数递减，极细粉砂、细粉砂和中粉砂在风沙流0~32 cm呈指数递增，在32 cm以上指数递减；张娅璐等[29-30]对风沙流观测时发现，随高度上升中砂含量减少、极细砂含量增加。本文进一步对不同高度层风沙流中粒度特征进行了分析，结果表明，由于不同下垫面地表植被产生不同风场特征和不同粒径沙粒大小和形态差异的共同作用，各粒径沙粒风沙流中垂直方向所占百分比的变化规律表现出明显不同。在风沙运动过程中，同一空气动力的作用下细颗沙粒起跳速度大于粗颗沙粒，随高度上升，粗颗沙粒出现机率减小，因此各下垫面风沙流随高度上升粉砂和极细砂百分占比增加，中砂含量随高度上升大幅减少。而由于在0~30 cm高度内粉砂和极细砂增加幅度较小，中砂含量大幅降低，因此细砂含量小幅增加，30 cm以上粉砂和极细砂含量大幅降低，中砂含量接近于0，细砂含量大幅度降低。但农田与其余下垫面地表样品各粒度组分差异显著，粉砂和极细砂含量较高，中砂含量接近于0，因此随高度上升粉砂和极细砂含量逐渐增加，细砂含量逐渐减少。

Cu、Fe、Mn、Zn等营养元素广泛存在于各种矿物以及岩石中，其含量一般低于1%[31-32]。不同下垫面由于沉积物母质、植被覆盖和人为干扰的影响，随粒径减小元素含量变化规律有异。杜德文等[33]研究表明，海底表层地球化学元素具有粒度效应，Mn元素与粒级具有显著负相关性，Mn元素以较大颗粒形式存在于表层沉积物中；城市道路表土中Cu、Zn元素在不同粒径级中分布变异系数较大，平均变异系数分别为37.67、14.11，随粒径变细Cu、Zn元素含量明显增加[34]；西安城市公园表土中，在<0.05、0.05~0.097、0.097~0.15、0.15~0.30、0.30~0.45粒径范围中，Zn元素平均含量分别为117.6 $mg\cdot kg^{-1}$、113.7 $mg\cdot kg^{-1}$、114.5 $mg\cdot kg^{-1}$、105.8 $mg\cdot kg^{-1}$、100.0 $mg\cdot kg^{-1}$随粒径减小而增加，Mn元素含量分别为628.1 $mg\cdot kg^{-1}$、672.7 $mg\cdot kg^{-1}$、732.6 $mg\cdot kg^{-1}$、703.5 $mg\cdot kg^{-1}$、681.8 $mg\cdot kg^{-1}$，随粒径减小呈先增加后减少的趋势[35]；新疆伊犁河谷沙漠沉积物中Fe、Mg元素趋向于细粒级中富集，K元素含量随粒径增大先减少后增加，在16~32 μm粒径组分含量最低[36]。由于研究土壤母质以及风沙环境的不同，本文各下垫面沉积物中Cu、Fe、Mn、Zn元素含量存在差异，各营养元素均在防风阻沙林中含量最高，除Mn元素在农田防护林中含量最低，其余元素均在农田中含量最低，并且风沙流中Cu、Fe、Mn、Zn的平均含量均大于地表中含量。在地表沉积物中，Cu、Zn元素含量随粒径减小而增加，Mn元素含量随粒径的减小呈现先增加后减少的趋势，在极细砂中含量最高，在农田中由于人为活动干扰严重，Fe元素含量随粒径减小而增加，而在其余下垫面中呈先增加后减小的变化趋势。

地表颗粒被剥蚀、搬运过程中使得土壤中植物生长所需的大量养分随风沙运动流失，受防护体系的影响，不同下垫面对风沙运动干扰程度不同，使得风沙搬运与堆积动力出现差异，这也是导致风沙流结构差异和微量元素含量迁移富集变化的主要原因。有研究表明，风沙流中随高度上升极细砂、粉砂含量增加，进而沉积物中C、N含量也随之增加，但不同下垫面C、N的增加幅度却不相同[37]。本研究中各下垫面地表沉积物中Cu、Zn、Mn元素含量均随粒径减小而增加，粉砂和极细砂中含量最高，而由于各下垫面对风沙流中沙粒产生的物质再分配作用下，风沙流中随高度上升粉砂和极细砂占比增加，Cu、Zn、Mn元素含量也随之增加。而除农田外各下垫面地表沉积物Fe元素在细砂中含量最高，在风沙流中中砂含量呈现出先增加后减少的趋势，并在30 cm处左右达到峰值，因此Fe元素在风沙流表现出先增加后减少的趋势，农田地表沉积物中在粉砂中含量最高，风沙流中粉砂含量随高度上升占比增加，Fe元素含量随之增加；通过皮尔逊相关性分析可知，各下垫面风沙流中Cu、Fe、Mn、Zn元素含

量与风沙流中粒径特征具有相关性，并且与各下垫面地表沉积物不同粒径元素含量特征相同，因此可以表明Cu、Fe、Mn、Zn营养元素在风沙流中的富集特征与地表沉积物各粒径含量特征密切相关。

4　结　论

（1）与流动沙地相比，农田和有植被地表的地表粗糙度明显增加，近地表风速大幅减弱，10 cm处风速降低18%以上，且随高度上升防风效能降低；各下垫面总输沙量明显减少，与流动沙地相比减少58.1%以上。

（2）各下垫面地表沉积物中Cu、Fe、Mn、Zn元素含量存在显著差异，且在不同粒度沙粒中含量也不相同，其中，Cu、Zn元素在粉砂中含量最多，Mn元素在极细砂中含量最多。在风沙流物质再分配的影响下，随着高度的上升粉砂和极细砂含量逐渐增加，平均较地表增加了约14倍，Cu、Zn、Mn元素含量随高度上升而增加；中砂含量逐渐减少，平均较地表减少了87.2%，而细砂含量呈现先增加后减少的趋势，Fe元素在细砂中含量最多，因此Fe元素含量先增加后减少。

参考文献（References）

[1] 王书转. 长期施肥条件下土壤微量元素化学特性及有效性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016. [Wang Shuzhuan. Study on chemical properties and effectiveness of soil trace elements under long-term fertilization conditions[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Research Center for Water and Soil Conservation and Ecological Environment of the Ministry of Education), 2016.]

[2] Shuman L M. Extraction method for soil microelements[J]. Soil Science, 1985, 140: 11–12.

[3] Tessier, Campbell, Blsson. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Anal Chem, 1979, 51(7): 844–851.

[4] Ribeiro, Bruno T, Nascimento, et al. Assessment of trace element contents in soils and water from Cerrado Wetlands, Triângulo Mineiro Region[J]. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2019, 43: e0180059, doi: 10.1590/18069657RBCS20180059.

[5] Zhang F S, Yin G H, Wang Z Y, et al. Quantifying spatial variability of selected soil trace elements and their scaling relationships using multifractal techniques[J]. PloS one, 2013, 8(7): e69326, doi: 10.1371/journal.pone.0069326.

[6] 孙先良. 从植物微量元素营养需求来发展微肥[J]. 化工进展, 2001(11): 5–7. [Sun Xianliang. Development of micro-fertilizer[J]. Chemical Industry and Engineering Progress , 2001(11): 5–7.]

[7] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 127–133. [Chen Huaiman. Environmental soil science[M]. Beijing: Science Press, 2005: 127–133.]

[8] 文勇立, 李辉, 李学伟, 等. 川西北草原土壤及冷暖季牧草微量元素含量比较[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2837–2846. [Wen Yongli, Li Hui, Li Xuewei, et al. Research on comparison of the content of trace element in soil and forage in northwest Sichuan grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2837–2846.]

[9] Kyriaki D, Sergio C, Silvia M, et al. Trace elements mobility in soils from the hydrothermal area of Nisyros (Greece)[J]. Annals of Geophysics, 2015, 57: 149–155.

[10] 张欣. 山地丘陵区环境因子对耕地土壤剖面微量元素含量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [Zhang Xin. The influence of environmental factors on the content of trace elements in cultivated soil profile in mountainous and hilly areas[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]

[11] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙区不同下垫面的土壤风蚀特征[J]. 林业科学, 2017, 53(3): 128–137. [Liu Fang, Hao Yuguang, Xin Zhiming, et al. Characteristics of soil wind erosion under different underlying surface conditions in Ulanbuh Desert[J]. Science Silvae Sinicae, 2017, 53(3): 128–137.]

[12] 吴盈盈, 王振亭. 河套平原土壤风蚀风险评估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 418–427. [Wu Yingying, Wang Zhenting. Risk assessment of soil wind erosion in Hetao Plain[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 418–427.]

[13] 张华, 李锋瑞, 张铜会, 等. 春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 29–32, 79. [Zhang Hua, Li Fengrui, Zhang Tonghui, et al. Field observation of wind erosion sediment in bare sandy farmland during erosion-prone spring[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 29–32, 79.]

[14] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 31–33. [Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Dong Guangrong, et al. Wind tunnel studies on influences of vegetation on soil wind erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 31–33.]

[15] 董光荣, 李长治, 金炯, 等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J]. 科学通报, 1987, 32(4): 297–301. [Dong Guangrong, Li Changzhi, Jin Jiong, et al. Some results of wind tunnel simulation experiments on soil wind erosion[J]. Chinese Science Bulletin, 1987, 32(4): 297–301.]

[16] 张伟民, 王涛, 汪万福, 等. 复杂风况条件下戈壁输沙量变化规律的研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 543–549. [Zhang Weimin, Wang Tao, Wang Wanfu, et al. Variation of Gobi sand transport amount under multi-wind directions[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(3): 543–549.]

[17] Dong Z B, Man D Q, Luo W Y, et al. Horizontal aeolian sediment flux in the Minqin area, a major source of Chinese dust storms[J]. Geomorphology, 2010, 116: 58-66.

[18] 王自龙, 赵明, 冯向东, 等. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流结构的观测研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 72-75, 108. [Wang Zilong, Zhao Ming, Feng Xiangdong, et al. Study on structure of drifting sand flux under different underlying surface conditions of Minqin oasis external[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 72-75, 108.]

[19] 王涛, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 库布齐沙漠典型防护林土壤养分特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 325-331. [Wang Tao, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Soil nutrient characteristics of typical shelterbelt in Hobq Desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 325-331.]

[20] 潘美慧, 薛雯轩, 伍永秋, 等. 西藏定结地区爬坡沙丘粒度特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1337-1345. [Pan Meihui, Xue Wenxuan, Wu Yongqiu, et al. Grain size characteristics of the climbing dunes in Dinggye area of Tibet[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1337-1345.]

[21] Hansen E, Zimmerman S D, Dijk D V, et al. Patterns of wind flow and aeolian deposition on a parabolic dune on the southeastern shore of Lake Michigan[J]. Geomorphology, 2009, 105(1/2): 147-157.

[22] 刘海霞, 李晋昌, 苏志珠, 等. 毛乌素沙地西南缘灌丛沙丘沉积物的粒度和元素特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 24-31. [Liu Haixia, Li Jinchang, Su Zhizhu, et al. The characteristics of grain size and chemical elements of the nebkha sediments in the southwestern margin of the Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 24-31.]

[23] 沈亚萍, 张春来, 李庆, 等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 150-157. [Shen Yaping, Zhang Chunlai, Li Qing, et al. Grain-size characteristics of surface sediments in the eastern desert regions of China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 150-157.]

[24] 刘倩倩, 杨小平. 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数的空间变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 158-168. [Liu Qianqian, Yang Xiaoping. Spatial variations of grain size parameters of dune sands in the Mu Us Sandy land and Hobq Sand sea, northern China and its potential causes[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 158-168.]

[25] 万玲玲, 董智, 李红丽, 等. 沙柳方格沙障对库布齐沙漠沙丘粒度分布的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 165-170. [Wan Lingling, Dong Zhi, Li Hongli, et al. Effects of salix psammophila checkerboard sand barrier on the distribution and characteristics of sand particle size in Kubuqi Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 165-170.]

[26] 闫敏, 左合君, 贾光普, 等. 不同防沙措施的风沙流及其携沙粒度垂直分异特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1513-1522. [Yan Min, Zuo Hejun, Jia Guangpu, et al. Vertical differentiation characteristics of wind-sand flow and its grain size under different sand control measures[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1513-1522.]

[27] 邢恩德, 马少薇, 郭建英, 等. 植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 331-334. [Xing Ende, Ma Shaowei, Guo Jianying, et al. Effect of vegetation cover on sandstorm structure and rate of wind erosion in typical steppe[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 331-334.]

[28] 黎小娟, 李宁, 周智彬, 等. 尼龙网方格沙障的风沙流颗粒分布特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 128-134. [Li Xiaojuan, Li Ning, Zhou Zhibin, et al. Characteristic of sand flux structure and sand particle size distribution based on nylon net checkerboard barrier[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 128-134.]

[29] 张娅璐. 蒙古高原戈壁沙漠表层沉积物的理化性质及物源分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020. [Zhang Yalu. Physical and chemical properties and provenance analysis of surface sediments in gobi and desert of the Mongolian Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2020.]

[30] 徐军, 郝玉光, 刘芳, 等. 乌兰布和沙漠不同下垫面风沙流结构与变异特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 95-98. [Xu Jun, Hao Yuguang, Liu Fang, et al. Wind-sand flow structure and its variation under different surface conditions in the Ulanbuhe Desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 95-98.]

[31] 赖书雅. 南阳盆地东部山区土壤铁、锰、铜和锌分布特征及其影响因素[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022. [Lai Shuya. The distribution characteristics and influencing factors of soil Fe, Mn, Cu and Zn in mountainous area of eastern Nanyang Basin[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Geosciences, 2022.]

[32] Banuelos G S, Ajwa H A. Trace elements in soils and plants: An overview[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 1999, 34(4): 951-974.

[33] 杜德文, 石学法, 孟宪伟, 等. 黄海沉积物地球化学的粒度效应[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 78-82. [Du Dewen, Shi Xuefa, Meng Xianwei, et al. Geochemical granularity effect of sediment in the Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1): 78-82.]

[34] 谢远云, 孟杰, 郭令芬, 等. 哈尔滨城市道路表土记录的痕量元素在不同粒级中的分布特征[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 629-635. [Xie Yuanyun, Meng Jie, Guo Lingfen, et al. The distribution of trace elements in different grain-size fractions inferred from road surface soil in Harbin City, Heilongjiang Province[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 629-635.]

[35] 康丹. 西安城市公园不同粒径土壤中重金属污染研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010. [Kang Dan. Study on heavy metal pollution in soil with different particle sizes in Xi'an Urban Park[D] Xi'an: Shaanxi Normal University, 2010.]

[36] 李金婵, 陈秀玲, 贾丽敏, 等. 新疆伊犁河谷沙漠沉积不同粒径

组分的地球化学元素分布特征[J]. 地球环境学报, 2014, 5(2): 102−110. [Li Jinchan, Chen Xiuling, Jia Limin, et al. The distribution of geochemical elements in different grain-size fractions of desert sediments in lli Valley of Xinjiang, China[J]. Journal of Earth Environment, 2014, 5(2): 102−110.]

[37] 闫影影. 不同放牧强度苏尼特右旗荒漠草原风沙流结构与养分特征[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021. [Yan Yingying. Structure and nutrient characteristics of aeolian sand flow in desert steppe under different grazing intensities in sunite right banner[D] Tai' an: Shandong Agricultural University, 2021.]

Redistribution characteristics of aeolian sand flow on different underlying surfaces at the edge of Hobq Desert and their enrichment effect on nutrients

YAN Min[1,2], CHEN Yuxin[3,4], ZUO Hejun[1,2], WANG Haibing[1,2], XI Cheng[1]

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Aeolian Sand Physics and Sand Control Engineering in Inner Mongolia, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 4. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrolongical National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Taking the five kinds of underlying surfaces i.e. mobile sand, sand sealing grass belt, wind and sand barrier forest, farmland shelter forest and farmland of Hobq Desert as the research objects, the particle size and elemental characteristics of sediments in the surface and 0−100 cm aeolian sand flow were analyzed by field observation and indoor analysis. The results showed that: (1) The surface roughness of farmland and vegetation-covered land increased significantly compared with moving sand, the wind speed at 10 cm decreased by more than 18%, and the total sand transport decreased by 85.6% on average. (2) The content of Cu, Fe, Mn and Zn in different grain sizes of sand is obviously different, Cu and Zn elements have the highest content in silt sand, Mn elements have the highest content in very fine sand, and Fe elements have the highest content in fine sand. (3) Under the redistribution of aeolian sand flow materials, the content of silt and very fine sand in aeolian sand flow increases with the uplift of height, which increases by about 14 times on average compared with the surface, and the content of Cu, Zn and Mn elements increases accordingly, the content of fine sand in aeolian sand flow increases first and then decreases, and the Fe element content also shows a trend of first increasing and then decreasing, which is closely related to the element content in the original surface and the element content characteristics of different particle sizes in surface sediments.

Key words: aeolian sand flow; particle size composition; element migration; Hobq Desert